

УДК 621.318

В.В.КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В.ВАВРИВ, И.В.ЯКОВЕНКО**ВЛИЯНИЕ ГЕНЕРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР
ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ПАРАМЕТРЫ ВНУТРЕННЕЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В работе показано, что генерация колебаний в полупроводниковых структурах технических средств, вызванное воздействием на них внешнего электромагнитного излучения непосредственно связано с затуханием плазмонов и его преобразованием в волны Ван-Кампена, сформулированы граничные условия для функции распределения частиц в потоке, получены выражения для декремента колебаний и построена кинетическая теория взаимодействия поверхностных плазмонов с электронным потоком, пересекающим границу раздела сред. Полученные в работе выражения для декрементов (временных характеристик степени затухания колебаний) позволяют определять мощность их излучения в условиях воздействия внешнего электромагнитного поля. Этот процесс характеризуется искажением рабочих (вольтамперных) характеристик полупроводниковых приборов и оказывает существенное влияние на их электромагнитную совместимость. Получены расчетные соотношения, связывающие величину декремента (инкремента) неустойчивости поверхностных колебаний в полупроводниковых структурах, обусловленные наличием наведенных сторонним электромагнитным излучением токов с параметрами полупроводниковых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры. Сравнительный анализ существующих экспериментальных и расчетных данных для типичных значений параметров полупроводниковых приборов при воздействии импульсного электромагнитного излучения показывает, что величина энергии излучения (затухания) колебаний определяется одним порядком величины и имеет общие тенденции изменения в зависимости от величин физических параметров комплектующих материалов и воздействующего импульса напряжения.

Ключевые слова: электромагнитные поля колебания плазма полупроводник неустойчивость генерация излучение заряженные частицы поверхностные волны

В.В.КНЯЗЕВ, В.І. КРАВЧЕНКО, Л.В.ВАВРІВ, І.В.ЯКОВЕНКО**ВПЛИВ ГЕНЕРАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НА ПАРАМЕТРИ ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ
СУМІСНОСТІ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

В роботі показано, що генерация коливань в напівпровідникових структурах технічних засобів, яка викликана впливом на них зовнішнього електромагнітного випромінювання, безпосередньо пов'язана з загасанням плазмонів і його перетворенням в хвилі Ван-Кампена. Сформульовані граничні умови для функції розподілу часток в потоці, отримані вирази для декремента коливань і побудована кінетична теорія взаємодії поверхневих плазмонів з електронним потоком, які перетинають межу розділу середовищ. Отримані в роботі вирази для декрементів (тимчасових характеристик ступеня загасання коливань) дозволяють визначати потужність їх випромінювання в умовах впливу зовнішнього електромагнітного поля. Цей процес характеризується спотворенням робочих (вольтамперних) характеристик напівпровідникових приладів і має суттєвий вплив на їх електромагнітну сумісність. Отримано розрахункові співвідношення, що зв'язують величину декремента (інкремента) нестійкості поверхневих коливань в напівпровідникових структурах, зумовлені наявністю наведених стороннім електромагнітним випромінюванням струмів з параметрами напівпровідникових структур: концентрацією вільних носіїв, діелектричної проникності, розмірами структури. Порівняльний аналіз існуючих експериментальних і розрахункових даних для типових значень параметрів напівпровідникових приладів при впливі імпульсного електромагнітного випромінювання показує, що величина енергії випромінювання (загасання) коливань визначається одним порядком величини і має загальні тенденції зміни в залежності від величин фізичних параметрів комплектуючих матеріалів і діючого імпульса напруги.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

V.V. KNYAZEY, V.I. KRAVCHENKO, L.V. VAVRIV, V.V. YAKOVENKO**INFLUENCE OF MODE OF OSCILLATION GENERATION
ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES
IN CONDITIONS OF ACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION**

It is shown in this work that damping of plasmons is caused by their transformation into van Kampen waves, boundary conditions for function of distribution of particles in flow are formulated, expressions for oscillation decrement are obtained and kinetic theory of interaction of surface plasmons with electron flow crossing an interface has been formed. The expressions for decrements (time characteristics of degree of oscillation damping) obtained in the work allow determining power of their radiation in conditions of action of external electromagnetic field. This process is characterized by distortion of performance (volt-ampere) characteristics of semiconduc-

© В.В.Князев, В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко, 2019

tor devices and causes significant influence on their electromagnetic compatibility. Calculated relations connecting the value of decrement (increment) of instability of surface oscillations in semiconductor structures, caused by presence of currents induced by extraneous electromagnetic radiation, with parameters of semiconductor structures: concentration of free carriers, permittivity, structure dimensions have been obtained. Comparative analysis of existing experimental and calculated data for typical values of parameters of semiconductor devices under action of pulsed electromagnetic radiation shows that the value of energy of radiation (attenuation) of oscillations is determined by the same order of the value and has common tendencies of variation depending on the values of physical parameters of component materials and applied voltage pulse.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves

Введение. Все многообразие отказов (основных характеристик электромагнитной совместимости), возникающих в радиоэлектронной аппаратуре как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [1]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности изделия. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик [4,5].

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния (ЭМИ) на электрорадиоизделия (ЭРИ) относятся к области необратимых отказов [2]. Вместе с тем, большинство вопросов, связанных с определением степени влияния на рабочие характеристики ЭРИ процессов взаимодействия наведенных ЭМИ токов с собственными электромагнитными колебаниями, протекающих непосредственно в комплектующих ЭРИ, остаются открытыми.

Между тем, именно взаимодействия такого рода определяют степень отклонения выходных характеристик от нормы и возможности восстановления их нормального функционирования, т.е. критерии обратимых отказов.

Настоящая работа компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в твердотельных структурах, используемых в современной СВЧ – электронике, приводящее к изменениям вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов (установлению режима генерации (затухания) колебаний).

Цель работы. Разработка физической модели возникновения обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов). Обоснование адекватности предложенной в работе физической модели возникновения обратимых отказов путем сравнительного анализа существующих экспериментальных и расчетных данных.

Основные результаты. Свойства среды и элект-

ромагнитных колебаний будем описывать системой уравнений (1) – (4) (уравнения Максвелла и материальные уравнения). В дальнейшем, зависимость всех переменных величин, входящих в уравнения (1) – (4), от координат и времени выбираем в виде

$$\vec{E}(x, y, t) = \vec{E}(\omega, q_x, y) \exp[i(q_x x - \omega t)], \quad \omega > 0, \quad q_x > 0.$$

Пусть область $y < 0$ занимает вакуум (среда 1), а область $y > 0$ – плазма полупроводника (среда 2). При этом границу раздела сред пересекает поток заряженных частиц, движущихся вдоль положительного направления оси y со скоростью v_0 . Кинетическая энергия частицы значительно превосходит высоту потенциального барьера на границе. В случае, когда эффектом запаздывания можно пренебречь, свойства среды и электромагнитных колебаний описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + e \vec{E} \frac{\partial f_0}{\partial \vec{p}} = -\nu f; \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E}(x, y, t) = 0; \quad \text{div } \vec{D} = 4\pi en; \quad e \frac{\partial n}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0; \quad (2)$$

$$\vec{D}(x, y, t) = \int_{-\infty}^t \hat{\epsilon}(t-t') \vec{E}(x, y, t') dt'$$

$$\vec{j}(x, y, t) = e \int \vec{v} f(x, y, t, \vec{p}) d\vec{p}, \quad (3)$$

где $\hat{\epsilon}(t-t')$ – функция отклика, характеризующая электромагнитные свойства среды, $f_0(\vec{p}) = n_0 \delta(p_x) \delta(p_z) \delta(p_y - p_0)$ – равновесная функция распределения электронов пучка с квадратичным законом дисперсии, f – малая добавка к функции распределения в возмущенном состоянии, ν – эффективная частота столкновения электронов, n, \vec{v} – их концентрация и скорость, \vec{E} – напряженность электрического поля.

Тогда

$$\vec{D}(\omega, q_x, y) = \epsilon(\omega) \vec{E}(\omega, q_x, y), \quad (4)$$

$$\epsilon(\omega) = \int_0^{\infty} \hat{\epsilon}(t) \exp(i\omega t) dt - \text{диэлектрическая проницае-}$$

мость среды. Предполагая, что $\epsilon(\omega) = \epsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$, где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная решетки, ω_0 – ленгмюровская частота электронов проводимости среды, а $\omega > 0; q_x > 0$. Решение кинетического уравнения (1)

можно представить в виде:

$$f = -\frac{e}{v_y} \int_{-\infty}^y \tilde{E} \frac{\partial f_0}{\partial p} \exp\left[\frac{i\tilde{\omega}}{v_y}(y-y')\right] dy'; \quad (5)$$

$$\tilde{\omega} = \omega - q_x v_x + i\nu; \quad v_y > 0$$

Неопределенная константа C находится из граничных условий. Поскольку при $y \rightarrow -\infty$ функция распределения должна быть ограничена, то $C = -\infty$. Поэтому в области $y \leq 0$ получим:

$$f_1 = -\frac{e}{v_y} \int_{-\infty}^y \tilde{E} \frac{\partial f_0}{\partial p} \exp\left[\frac{i\tilde{\omega}}{v_y}(y-y')\right] dy'. \quad (6)$$

В случае слабой пространственной дисперсии выражение (6) можно упростить, воспользовавшись неравенством $\omega \gg q_x v_x$, $l\omega/v_0 \gg 1$, l – глубина проникновения поля в среду. Произведя замену переменных $y' = y = z$ и разлагая $\tilde{E}(y+z)$ в ряд по z , получим:

$$f_1(y) = \frac{e\tilde{E}_1(y)}{i\omega} \frac{\partial f_0}{\partial p}; \quad \omega \gg \nu. \quad (7)$$

Чтобы найти C в области $y > 0$, сформулируем условие на поверхности $y = 0$. Полагая, что число частиц, падающих на границу, равно числу частиц, прошедших в среду 2, можно записать:

$$f_1(y=0) = f_2(y=0). \quad (8)$$

Отсюда находим:

$$f_2(y) = \frac{e}{i\omega} \frac{\partial f_0}{\partial p} \left[\tilde{E}_2(y) + \tilde{F}(y) \exp\left(\frac{i\omega^*}{v_y} y\right) \right], \quad (9)$$

$$\omega^* = \omega + i\nu,$$

где $\tilde{F}(y) = \tilde{E}_1(0) - \tilde{E}_2(y)$.

Второе слагаемое описывает волны Ван-Кампена, возбуждаемые вблизи границы в среде 2. Электрическая индукция

$\vec{D}(\omega, q_x, y) = \varepsilon(\omega) \vec{E}(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi i}{\omega} \vec{j}(\omega, q_x, y)$ в средах 1, 2 приобретает следующий вид:

$$\vec{D}_1(\omega, q_x, y) = \varepsilon_1(\omega) \vec{E}_1(\omega, q_x, y); \quad (10)$$

$$\vec{D}_2(\omega, q_x, y) = \varepsilon_2(\omega) \vec{E}_2(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi e^2}{\omega^2} \int v \left(\frac{\partial f_0}{\partial p} \tilde{F}(y) \right) \exp\left(i \frac{\omega^*}{v_y} y\right) d\vec{p}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_1(\omega) = 1 - \omega_b^2/\omega^2$, $\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon(\omega) - \omega_b^2/\omega^2$, ω_b – ленгмюровская частота электронов пучка.

Система уравнений (1) – (4) для каждой из сред преобразуется к уравнениям [5,6]:

$$\frac{\partial^2 E_{x1}}{\partial y^2} - q_x^2 E_{x1} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 E_{x2}}{\partial y^2} - q_x^2 E_{x2} = \frac{4\pi e^2 q_x F_y}{\omega \varepsilon_2(\omega)} \int \frac{\partial f_0}{\partial p_y} \exp\left(\frac{i\omega^*}{v_y} y\right) dp_y. \quad (13)$$

В среде 1 выражения для полей приобретают вид:

$$E_{x1} = A_1 \exp(q_x y); \quad E_{y1} = -iE_{x1}. \quad (14)$$

Уравнение (13) решаем методом последовательных приближений, полагая, что концентрация электронов пучка много меньше концентрации электронов среды: $\omega_0 \gg \omega_b$. Тогда E_{x2} принимает вид:

$$E_{x2} = A_2 \exp(-q_x y) + \frac{4\pi e^2 q_x (A_1 + A_2 \exp(-q_x y))}{\omega^3 \varepsilon_2(\omega)} \int v_y^2 \frac{f_0}{\partial p_y} \exp\left(\frac{i\omega^*}{v_y} y\right) dp_y, \quad (15)$$

где $\varepsilon(\omega) \neq 0$.

Нормальная составляющая вектора электрической индукции оказывается равной:

$$D_y = i\varepsilon_2(\omega) A_2 \exp(-q_x y). \quad (16)$$

Воспользовавшись далее условием непрерывности нормальных составляющих \vec{D} и тангенциальных составляющих \vec{E} на границе раздела сред $y = 0$, находим следующее дисперсионное уравнение для поверхностных плазмонов:

$$\frac{1 + \varepsilon(\omega)}{1 - \varepsilon(\omega)} = \frac{2i\omega_b^2 q_x v_0}{\omega^3 \varepsilon(\omega)}. \quad (17)$$

Принимая во внимание малость правой части выражения (17), определим собственную частоту поверхностных плазмонов и их декремент:

$$\omega_3 = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + 1}} - \frac{2i\omega_b^2}{\omega_0^2} q_x v_0. \quad (18)$$

Таким образом, затухание поверхностных плазмонов обусловлено их преобразованием в волны малой плотности частиц – волны Ван-Кампена, возбуждаемые вблизи границы раздела. Сравнение формулы (17) с результатами [3], показывают, что в гидродинамическом приближении для получения величины декремента необходимо в среде 2 учитывать в потоке частиц две волны пространственного заряда, убывающие и нарастающие при $y \rightarrow \infty$. При этом на границе, кроме обычных электродинамических условий для полей, должны выполняться два дополнительных условия: непрерывность потока частиц и потока импульса частицы через границу [7].

Если же в гидродинамическом приближении учитывать только убывающие от границы волны пространственного заряда с условием непрерывности нормальной составляющей потока частиц на границе (поток импульса частиц разрывен), то декремент плазмонов оказывается в два раза меньше, чем в формуле (18).

Ясно, что кинетическое описание взаимодействия плазмонов с потоком частиц через волны Ван-Кампена является более рациональным и корректным,

поскольку все величины являются конечными при $y \rightarrow \infty$ и используется только одно дополнительное граничное условие.

В заключение рассмотрим взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком частиц при их упругом отражении от границы (бесконечно высокий потенциальный барьер).

Обозначим через $f_0^\pm(\vec{p}) = n_0 \delta(p_x) \delta(p_y \mp p_0) \delta(p_z)$ функции распределения частиц, падающих ($p_y > 0$) и отраженных ($p_y < 0$) от границы раздела и соответственно через f^\pm возмущенные добавки к ним. Каждая из этих функций, естественно, удовлетворяет кинетическому уравнению (3.4). В результате решения этих уравнений в приближении слабой пространственной дисперсии и выполнения граничных условий

$$f^+(p_x, p_y, p_z, y=0) = f^-(p_x, -p_y, p_z, y=0) \quad (19)$$

получим:

$$f^+(\vec{p}, y) = \frac{e \vec{E}_1(y)}{i\omega} \frac{\partial f_0^+(\vec{p})}{\partial \vec{p}}; \quad (20)$$

$$f^-(\vec{p}, y) = \frac{e}{i\omega} \vec{E}_1(y) \frac{\partial f_0^-(\vec{p})}{\partial \vec{p}} - C(\vec{p}, y) \exp\left(\frac{i\omega^* y}{v_y}\right);$$

$$C(\vec{p}, y) = \frac{e}{i\omega} \times \left[\vec{E}_1(y) \frac{\partial f_0^-(\vec{p})}{\partial \vec{p}} + \right. \quad (21)$$

$$\left. + E_{y1}(0) \frac{\partial f_0^-(-p_y)}{\partial p_y} - E_{x1}(0) \frac{\partial f_0^-(-p_y)}{\partial p_x} \right].$$

Уравнение (12) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 E_{x1}}{\partial y^2} - q_x^2 E_{x1} = \frac{4\pi e q_x}{\varepsilon_1(\omega)} \int_{v_y > 0} C(\vec{p}, y) \exp\left(\frac{i\omega^* y}{v_y}\right) d\vec{p}. \quad (22)$$

Из уравнений (21) – (22) следует:

$$E_{x1}(\omega, q_x, y) = A_1 [\exp(q_x y) + \frac{8\pi e^2 q_x}{\omega^3 \varepsilon_1(\omega)} \int_{v_y} v_y^2 \frac{\partial f_0^-(\vec{p})}{\partial p_y} \exp\left(\frac{i\omega^* y}{v_y}\right) dp_y]. \quad (23)$$

Электрическая индукция в среде 1:

$$D_{y1}(\omega, q_x, y) = \varepsilon_1(\omega) \times E_{y1}(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi e}{\omega} \int_{v_y} v_y f^-(\vec{p}, y) d\vec{p}$$

при $\omega^2 \gg \omega_b^2$ оказалась равной $-iA_1 \exp(q_x y)$. Правая часть уравнения (13) в этом случае равна нулю и поле в среде 2 запишется:

$$E_{x2} = A_2 \exp(-q_x y); \quad E_{y2} = iE_{x2}. \quad (24)$$

Видно, что декремент поверхностных плазмонов остается одним и тем же, как при бесконечно большом потенциальном барьере, так и бесконечно малом по сравнению с кинетической энергией частицы.

При воздействии стороннего ЭМИ над границей диэлектрик – полупроводник движется поток заря-

женных частиц, распределение которых в импульсном пространстве описывается функцией:

$$f(\vec{p}) = n_{0b} \delta(p_x - p_0) \delta(p_z) \delta(p_y); \quad p_0 = mv_0. \quad (25)$$

Чтобы оценить величину потерь энергии потока частиц на возбуждение поверхностных колебаний необходимо провести суммирование по всем скоростям частиц.

Воспользовавшись граничными условиями для поля и электрической индукции, находим:

$$1 + \varepsilon(\omega) = -\frac{4i\omega_b^2 q_x v}{\omega^3}. \quad (26)$$

Сравнительный анализ существующих экспериментальных [8, 11] и расчетных данных, полученных на основе соотношения (18) для типичных значений параметров полупроводниковых приборов [2], при воздействии ЭМИ (амплитуда напряженности электрического поля $E < 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, длительность импульса

$\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3 \text{ нс}$). показывает, что величина энергии излучения (затухания) колебаний определяется одним порядком величины $\Delta W_{\text{изл}} \approx 10^{-7} - 10^{-9} \text{ Дж}$ и имеет общие тенденции изменения в зависимости от величин физических параметров комплектующих материалов и воздействующего импульса напряжения.

Выводы. Получены расчетные соотношения, связывающие величину декремента (инкремента) неустойчивости поверхностных колебаний в полупроводниковых структурах, обусловленные наличием наведенных сторонним электромагнитным излучением токов с параметрами полупроводниковых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями структуры диэлектрик – полупроводник, показано что затухание поверхностных плазмонов обусловлено их преобразованием в волны малой плотности частиц - волны Ван-Кампена, возбуждаемые вблизи границы раздела.

Обоснована адекватность предложенной в работе физической модели возникновения обратимых отказов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения, при которых реализуется данная физическая модель (амплитуда

напряженности электрического поля $E < 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, длительность импульса $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3 \text{ нс}$).

Результаты сравнительного анализа полученных в настоящей работе экспериментальных и расчетных данных позволяют использовать предложенную физическую модель обратимых отказов и полученные на ее основе расчетные соотношения для определения кри-

териев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения. (появлению S –образных участков прямого тока).

Список литературы

1. Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда В.М., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. Киев: Наукова думка, 1991. 216 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Мир, 1984. 456 с.

3. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. Москва: Радио и связь, 1979. 225 с.

4. Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. Москва: Атомиздат, 1973. 312 с.

5. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. Москва: Радио и связь, 1988. 235 с.

6. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2009. № 11. С. 62-69.

7. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2012. № 21. С.154-161.

8. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2012. № 21. С. 161-169.

9. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С. 83-89.

10. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С. 96 -103.

11. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С.103-111.

References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jeletromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.

2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Mir. 1984. 456 p.

3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jeletromagnitnye vlijaniya na sooruzheniya svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.

4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.

5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.

6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izlucheniya na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhih jelettroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2009. No 11. P. 62-69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jeletromagnitnyh kolebanij v 2-D jelettronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. № 21. P.154-161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. № 21. P. 161-169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhih jelettroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 83-89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelettroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izlucheniya [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 96-103.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jeletronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izlucheniya [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 27.04.2019.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Володимир Володимирович (Князев Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Volodymyr Ivanovych) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: tc22@i.ua.

Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри Системи інформації Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

Ваврив Людмила Владиславівна (Ваврив Людмила Владиславовна, Vavriv Ljudmila Vladislavovna) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна, тел.: (057) 707-63-09; e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

УДК 621.318

В.В. КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В. ВАВРИВ, И.В. ЯКОВЕНКО**ФИЗИКА ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ**

Определены механизмы появления неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых структур, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях. Изучены механизмы затухания поверхностных плазмонов в условиях, когда температура носителей проводящих твердых тел много меньше энергии плазмона (квантовое приближение). Получены выражения для декрементов поверхностных плазмонов при наличии бесконечно высокого и бесконечно малого потенциального барьера на границе раздела сред. Исследованы процессы затухания поверхностных колебаний, когда взаимодействие волн и частиц носит характер случайных столкновений и описывается методом вторичного квантования системы (представление чисел заполнения). Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов в результате их взаимодействия с электронами проводимости; приведены его решения, определяющие декремент колебаний и мощность спонтанного излучения частиц. Обоснована физическая модель возникновения обратимых отказов (влияния навязанных электромагнитным излучением токов на вольт - амперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения, при которых реализуется данная физическая модель.

Ключевые слова: электромагнитные поля колебания плазма полупроводник неустойчивость генерация излучение заряженные частицы поверхностные волны

В.В. КНЯЗЕВ, В.И. КРАВЧЕНКО, Л.В. ВАВРИВ, И.В. ЯКОВЕНКО**ФІЗИКА ЗВОРОТНИХ ВІДМОВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД**

Визначено механізми появи нестійкостей власних коливань напівпровідникових структур, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання. Показано, що вплив імпульсного електромагнітного випромінювання супроводжується виникненням струмів в провідних елементах виробів і виникненням їх внутрішніх полів. Розроблено теорію беззітківального загасання поверхневих поляритонів в квантовому і класичному наближеннях. Вивчено механізми загасання поверхневих плазмонів в умовах, коли температура носіїв провідних твердих тіл багато менше енергії плазмона (квантове наближення). Отримані вирази для декрементів поверхневих плазмонів при наявності нескінченно високого і нескінченно малого потенційного бар'єру на межі поділу середовищ. Досліджено процеси загасання поверхневих коливань, коли взаємодія хвиль і частинок носить характер випадкових зіткнень і описується методом вторинного квантування системи (подання чисел заповнення). Отримано кінетичне рівняння, що описує зміну числа поверхневих плазмонів в результаті їх взаємодії з електронами провідності; наведені його рішення, що визначають декремент коливань і потужність спонтанного випромінювання частинок. Обґрунтована фізична модель виникнення зворотних

© В.В.Князев, В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко, 2019